低温用鋼溶接継手の破壊強度評価への曲げ限界 COD 値の意義について*

貝原正一郎**, 村山武弘**, 河野 武亮**, 南二三吉***, 豊田政男***, 佐藤邦彦***

Applicability of Bending Critical CODs for Assessing Fracture Strength of Low-Temperature Service Steel Weldments*

by Shoichiro Kaihara**, Takehiro Murayama**, Takesuke Kohno**,
Fumiyoshi Minami***, Masao Toyoda*** and Kunihiko Satoh***

The objective structure of the present study is LPG storage tank and numerous bending COD tests and tensile tests with through thickness notches have been conducted on the practical low-temperature steel weldments. Statistical approach has been applied for considering the scattering features of critical COD in the practical joints and correlation of critical COD obtained from both tests.

The bending critical COD scatters widely even in the practical welded joint due to the existence of local brittle zone. The bending critical COD (δ_c^B) and the tensile critical COD (δ_c^T) are influenced by the plastic constraint dependent on specimen geometry. In case the fracture stress is lower than yield stress (σ_y), $\delta_c^T \approx \delta_c^B$. Nevertheless, when the fracture stress is higher than σ_y , that is fracture occurs in full yielding and general yielding. δ_c^T becomes considerably larger than δ_c^B due to the decrease of the constraint.

According to the above experimental results, consideration has been carried out on the procedure of the assessment of fracture toughness by using bending COD test. Accordingly, the following two cases should become acceptable in bending COD test for the welded joint of LPG storage tank.

- (a) Critical COD values of three bending COD test specimens are satisfied required value; e.g. 0.25 mm according to API 1104.
- (b) When one of three bending COD values is not satisfied the required value and min. value is more than critical COD of general yielding fracture in the practical welds; e.g. $\delta_c = 0.00028\sigma_y$ (σ_y in MPa, $\delta_c \approx 0.1$ mm in HT50), a second set of three test specimens may be performed. Five of the six tests must exceed the min. required critical COD. Furthermore, in that case, average value of δ_c^B is more than 0.5 mm.

Key Words: Bending COD test, Tensile test, Assessment of fracture toughness, LPG storage tank, Local brittle zone, COD, Brittle fracture

1. 緒 言

溶接部の破壊靱性を BS 5762 (1979)¹⁾ に準拠した 3 点曲げ COD 試験によって求める場合、限界 COD 値のばらつきの一つの原因は切欠き前縁に沿って局部的劣化部が存在することである。例えば、低温用鋼の X 型突合せ継手から採取したクロスボンド型の 3 点曲げ COD 試験の結果によると、溶接ボンド部近傍に存在する数 100 μm 程度の劣化部のために、時として非常に小さな限界 COD 値を示すことが確められている²⁾。一方、切欠き前縁に沿って人工的に局部的劣化部を含ませた溶接継手について行った 3 点曲げ COD 試験と切欠き付引張試験の結果によると、引張り限界 COD 値は曲げ限界 COD 値に比べて大きくなることが明らかにされている³⁾。しかしこの実験結果は、劣化部の板厚方向の深さが最も小さい場合でも板厚のおよそ 20% 程度の場合について得られたものであって、実用の溶接継手のように劣化部寸法が数 100 μm といった極めて小さい場合に対

してそのまま成立つかどうかは明らかでない。そこで本研究では、実用されている低温用鋼溶接継手を用いて、多数の 3 点曲げ COD 試験と切欠き付引張試験を行い、文献 3) の結果と併せて曲げ限界 COD 値と引張り限界 COD 値の比較考察を行うとともに、溶接部の曲げ COD 試験に基づいた LPG 貯蔵タンクの脆性破壊に対する安全性評価手法について一つの提案を行う。

2. 実 験

供試鋼板は LPG 貯蔵タンク用として実績の多い低温圧力容器用炭素鋼 (JIS G 3126-1984) SLA 33 BQ (鋼材 A) を用いた。溶接材料は、これも LPG 貯蔵タンク用として実績の多い 2.5% Ni 系被覆アーク溶接棒 (溶材 B) を用いた。それぞれの供試材料の化学成分と機械的性質を Table 1 に示す。これらの供試材料を用いて入熱 35 kJ/cm で多層盛溶接 (6 パス) した X 開先の溶接継手から、曲げ COD 試験片と切欠き付引張試験片を数多く切り出した (Fig. 1)。曲げ COD 試験 (実験 S) は溶接金属およびボンド部に板厚貫通切欠きを加工し、BS 5762 に準拠した標準試験片について行った。引張試験は溶接金属に板厚貫通切欠きを設けた狭幅引張試験 (実験 L1, 平行部幅 $W=100$ mm) と、ボンド部に板厚

*原稿受付 昭和60年8月30日 昭和61年度春季全国大会論文発表講演

**正 員 石川島播磨重工業(株) Member, Ishikawajima-

Harima Heavy Industries Co., Ltd.

***正 員 大阪大学 Member, Osaka University

Table 1 Properties of materials used

Steel	t (mm)	Chemical composition (%)								σ_y (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ_t^{11} (%)	vE_{-55} (J)	Remarks ²⁾
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Al	Ti					
A	20	0.09	0.23	1.23	0.020	0.004	—	—	—	421	510	53	280	SLA33BQ

Welding material	Welding method	Chemical composition (%)								σ_y (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ_t^{31} (%)	vE_{-50} (J)	Remarks
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Ti					
B	SMAW ⁴⁾	0.07	0.35	0.65	0.015	0.012	—	2.33	—	513	585	35.1	160	2.5Ni

Note: 1) JIS Z 2201 G.L.=50mm

2) JIS G 3126 (1984)

3) JIS Z 3111 G.L.=50mm

4) SMAW: Shielded metal arc welding

(1) 3-point bending COD test (Exp.S)

(2) Tensile test (Exp. L1, L2)

Fig. 1 Dimensions of bending COD test and tensile test

貫通切欠きを設け広幅引張試験(実験 L2, 平行部幅 $W=400$ mm)の2種類を行った。すべての試験片の切欠き先端には深さ 2 mm 程度の疲労予き裂を導入した。曲げ COD 試験片の疲労予き裂の導入は、10 トン容量のサーボパックを用いて BS 5762 に準じて行った。一方、引張試験片の疲労予き裂導入は 200 トン容量の立型疲労試験機を用いて、 $\Delta K \leq 31 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の条件で繰り返し数 30000~70000 回程度で行った。

溶接金属中央に切欠きを有する曲げ COD 試験(実験 S)と狭幅引張試験(実験 L1)の試験温度は、LPG 貯蔵タンクの設計温度 -50°C とした。ボンド部に切欠きを有する曲げ COD 試験を -50°C において行ったところ、かなりの数の試験片が最高荷重の後に延性破壊を生じたので、本研究の目的からすると試験温度 -50°C は適当でないと判断された。そこで、ボンド部に切欠きを有する曲げ COD 試験(実験 S)と広幅引張試験(実験 L2)の試験温度は -75°C とした。

曲げ COD 試験(実験 S)は、溶接金属の貫通切欠きのものを 25 本、クロスボンドタイプのものを 35 本試験した。狭幅引張試験(実験 L1)は溶接金属に貫通切欠きを設けたものを 10 本、広幅引張試験(実験 L2)はクロスボンドタイプのものを 6 本試験した。試験時には、切欠きの開口変位量、破断荷重、試験温度などを計測した。貫通切欠き付引張試験片のき裂開口変位量は、き裂先端より 9 mm 離れた位置で測定したクリップゲージ変位位置を Dugdale モデルによる換算比を用いて疲労予き裂先端の COD へ換算した。

3. 曲げ COD 試験における破壊発生挙動

2.5% Ni 系溶接金属に貫通切欠きを設けた実験 S から

Fig. 2 Examples of fracture initiation point in bending COD test specimen (Exp. S)

ら求めた -50°C の曲げ限界 COD は $0.07 \sim 2 \text{ mm}$ の広範囲にばらつき、時として小さな限界 COD が得られることがわかる。これは既報²⁾で明らかにしたように巨視的に均質材とみなせる溶接金属でも、溶接多重熱サイクルによるミクロ的な組織変化と靱性変化が存在するためと考えられる。

次に、溶接ボンド部に貫通切欠きを加工したクロスボンドタイプの曲げ COD 試験(実験 S)から求めた -75°C の曲げ限界 COD も同様に $0.02 \sim 1 \text{ mm}$ と大きくばらついた。これらクロスボンドタイプの試験片の破壊発生点を、まず破面上のシェブロンパターンの流れの観察によって決定し、さらにこの部分の SEM 写真によってへき開ファセットのリバーパターンの向きから発生点と予想される位置を決定した。次に Fig. 3 の図中に示す

Fig. 3 Relationship between COD at -75°C and distance from fusion line to fracture initiation point (Exp. S)

ようにこの破壊発生点を含んで断面に直角な断面 A-A' のミクロ組織を観察した。その結果の一例を Fig. 2 に示す。写真上の破壊発生点に矢印を付けているが、いずれもクロスボンドに貫通切欠きを導入したボンド部近傍の粗粒域から発生していることがわかる。そこで、破壊発生点と想定された位置の Fusion line からの距離を dy として、限界 COD との関係の求めると Fig. 3 のようになる。この結果から、クロスボンドタイプの曲げ COD 試験片の破壊発生については、切欠き前縁の一部分に含まれる局所的なボンド粗粒域近傍からの発生が多く、またポップインや低い限界 COD を呈する原因もこの局所的劣化部 (Local Brittle Zone=LBZ) であることがわかる。

4. 曲げ限界 COD と引張り限界 COD の比較

溶接金属とボンド部に貫通切欠きをもつ曲げ COD 試験 (実験 S) から得られた限界 COD と狭幅引張試験 (実験 L1) 及び広幅引張試験 (実験 L2) から得られた限界 COD の累積分布を Fig. 4 に示す。一部の曲げ COD 試験ではポップインが観察されたが、ポップインの有無にかかわらず最初の破壊発生時の限界 COD をプロットしてある。破壊様式は図中に示すように BS 5762 に準じてパターン C (δ_c), U (δ_u), M (δ_m) に分類した。図には引張試験片の破壊ネット応力を併せて示しているが、破壊応力はいずれも試験温度における材料の降伏応力 σ_y をこえており、パターン U, M の破壊様式であった。Fig. 4 によれば溶接金属およびボンド部の引張り限界 COD は曲げ限界 COD に比べて大きく、特に出現確率の低いところでは10倍程度のかなり大きな値となっていることがわかる。

一方、著者らは前報²⁾において本論文と同じ低温用鋼を使用し、高靱性な溶接棒 (Ni-free, Ti-B 系) と低靱性な溶接棒 (Si-Mn 系) とを適当に組合せることによって溶接金属に意図的に局所的な靱性劣化部を含む継手を作製し、溶接金属に切欠きをもつ曲げ COD 試験と引

張試験を行っている。この実験では靱性劣化部の深さ d を 0 mm (Q-0), 4~5 mm (Q-1), 14~18 mm (Q-2), 22 mm (Q-3) とかえているが、このうち試験片 (Q-1) の実験結果を Fig. 4 と同様の方法で図示すると Fig. 5 のようになる。

Fig. 5 によれば、引張試験の破壊が Full yield 以前に生じる場合には、引張り限界 COD (δ^T) は曲げ限界 COD (δ^B) とほぼ同じかやや大きい程度であるが、引張試験の破壊が Full yield したのちに生じる場合には、 δ^T は δ^B に比べていちじるしく大きくなっている。以上のことから、Fig. 4 において引張り限界 COD が曲げ限界 COD に比べていちじるしく大きくなっているのは、引張試験の破壊がいずれも Full yield 後に生じたためであると結論することが

できる。

5. 曲げ限界 COD と引張り限界 COD の対応に関する考察

前章のような観点から、LPG 貯蔵タンクを対象とした低温用鋼溶接継手の曲げ COD 試験 (実験 S) と引張

Fig. 4 Relationship between critical COD of bending COD test and tensile test and fracture stress of tensile test

Fig. 5 Relationship between critical COD of bending COD test and tensile test and fracture stress of tensile test

Fig. 6 Comparison of bending critical COD, δ_c^b and tensile critical COD, δ_c^t

試験 (実験 L1, L2) の限界 COD の比較を引張試験の破壊応力を考慮して整理すると Fig. 6 のようになる。また、同図中には前報³⁾で示した試験片 (Q-0)~(Q-3) の結果もまとめてある。図中の点はそれぞれの実験で求められた曲げ限界 COD (δ_c^b) と引張り限界 COD (δ_c^t) の累積分布から、 δ_c^t に対応する δ_c^b を求め、両者の関係をプロットしたもので、引張り破壊ネット応力が σ_y をこえていれば黒塗り印、 σ_y より低ければ白抜き印で示してある。この結果から、Full yield 以前では $\delta_c^t \approx \delta_c^b$ であるが、Full yield 後では $\delta_c^t > \delta_c^b$ を示すことがわかる。

すなわち、破壊に先立つき裂先端近傍の塑性変形の広がり限界 COD を支配しているといえる。これまでも「塑性拘束」という言葉で表現されているが、このような塑性変形の大きさに限界 COD が依存するならば、同じ材質でも引張試験において切欠き寸法の影響を受けるはずである。著者らの一部は引張試験片に表面切欠きを加工し、その深さを変化させることによって塑性拘束と限界 COD、破壊応力との関係を求めている。Fig. 7 は図中に示すような鋼材 SB 42、板幅 50 mm、板厚 20 mm に対して、表面切欠き深さ b を 1~11 mm に変化させて -50℃ で引張試験したときの破壊応力と限界 COD の結果である。上段にグロス断面の破壊応力を示すが、切欠き深さ b が長くなるにつれて、その破壊応力は低下している。引張り限界 COD は切欠き深さが 2 mm 以下と短くなると大きくなり、-50℃ では 0.5 mm の値となっている。同図中に標準タイプの曲げ COD 試験片 ($W=40$ mm, $B=20$ mm) から求めた限界 COD も示しているが、 $\delta_c=0.1\sim0.4$ mm 程度となっている。これらと引張り限界 COD を比較すると破壊応力が σ_y をこえる、つまり Full yielding を示す b の長さより短いときは $\delta_c^t > \delta_c^b$ となっており、限界 COD は塑性拘束の影響を受け、負荷応力レベル、切欠き寸法、靱性レベルなどに依存していることがわかる。

δ_c^t はき裂 (欠陥) 寸法および形状に依存するが、き裂寸法がそれほど大きくない場合、例えば BS 6235⁴⁾ の

Fig. 7 Results of critical COD and fracture stress in tensile test with surface notch

海洋構造物の要求値の中で示されている想定欠陥寸法の最大値、 $2\bar{a}=25\text{ mm}$ を仮想し、十分広幅の試験片が全面降伏 (General yield) する条件を BS 6493⁵⁾ に基づいて求めると次のようになる。

$$\delta/2\pi e_y \bar{a} = (e/e_y - 0.25) \quad \dots\dots(1)$$

$\sigma = \sigma_y$ とすると

$$\delta = 0.00028 \sigma_y (\delta \text{ in mm}, \sigma_y \text{ in MPa}) \quad \dots\dots(2)$$

本研究にとりあげた LPG 貯蔵タンク用低温用鋼の実験 S, L1, L2 および前報³⁾の継手 (Q-0)~(Q-3) の場合、 $\sigma_y=330\text{ MPa}$ であるから、広幅引張試験片が General yield する条件は(2)式より $\delta=0.1\text{ mm}$ となる。したがって、曲げ限界 COD, $\delta_c^B > 0.1\text{ mm}$ の場合には、引張り限界 COD, δ_T^B は δ_c^B よりいじむしく大きくなるかと予想される。

6. LPG 貯蔵タンクにおける曲げ COD 試験評価法に関する一提案

LPG 貯蔵タンクのような構造物では、溶接継手部の応力状態は巨視的には一様応力場と考えることができる。したがって、破壊性能の評価には広幅引張試験の結果が十分に活用できる。

これまで述べてきたように、引張り限界 COD (δ_T^B) は曲げ限界 COD (δ_c^B) よりもかなり大きくなり、たとえ曲げ限界 COD の値が小さくとも広幅引張試験の破壊性能が十分な値になることもある。このような曲げと引張りで差が生じる目安としては General yield するかどうかの条件を選ぶことができる。前章で述べたように BS 6235⁴⁾ で採用されているような仮想欠陥寸法 $\bar{a}=12.5\text{ mm}$ を適用すれば、General yield するときの δ_T^B は(2)式で与えられ、通常 LPG タンクに用いられる SLA 33 B クラスの50キロ鋼では $\delta_T^B=0.1\text{ mm}$ となる。いま Fig. 4 の結果をみると、曲げ COD 試験で $\delta_T^B=0.1\text{ mm}$ 程度となると広幅引張試験では引張り限界 COD (δ_T^B) が 0.5 mm 以上にもなっている。このように引張試験で General yield 後破壊するような条件では δ_T^B は十分に大きくなるので、靱性要求の観点からは想定欠陥寸法で破壊に先立って General yielding を生じさせることを条件とすればよい。この考え方に立つとき、曲げ COD 試験では δ_c^B が(2)式を満足すればよく、LPG タンク用の50キロクロス鋼溶接部では $\delta_c^B > 0.1\text{ mm}$ となればよい。

以上の考え方は決定論的な考察であるが、溶接部にはこれまでも示してきたように靱性に大きなばらつきが見られる。この場合、構造物全体の安全性を少ない試験本数で、どのように保証するかは富重要な問題である。そこで、次にこの点について曲げ COD 試験の試験片本数と結果の評価の仕方について考察する。

その場合、LPG タンク溶接部の引張破壊性能がいかにあればよい、すなわち必要引張り限界 COD がいくらあればよいかを

必要があるが、これまでに合理的に明らかにされた例は見当たらない。これまでにいろいろな構造物で要求限界 COD 値として採用されている値は、根拠は明らかでないが $0.13\sim 0.35\text{ mm}$ 程度のものが多い^{4,6,7)}。本実験をみると、曲げ限界 COD (δ_c^B) が 0.1 mm 以上であれば、このような範囲の要求 COD は広幅引張試験で十分に満足させ得る。

ところが、靱性試験として曲げ COD 試験を行う場合、一般には3本程度の有限試験片本数が用いられる。この3本の結果において、いずれもの値が上述の 0.1 mm 以上であれば、少なくともそれらの試験片と全く同じ材質の引張試験片では δ_T^B が十分大きな値となるといえる。しかし、靱性のばらつきを考えると、 δ_c^B が 0.1 mm 以下になる確率がかなり小さいかどうか判断できない。そこで、次のような条件のもとに、曲げ COD 試験の判定条件について考察する。

条件(1): 試験片本数は1セット3本とする。

条件(2): 実験結果のばらつき特性が LPG 貯蔵タンクにおける溶接部靱性の使用実績にほぼ適合すること。

条件(3): 曲げ限界 COD は 0.1 mm (50キロ鋼) を下まわらないこと。

Fig. 8 は LPG タンクとして使用実績のある溶接部の -59°C の曲げ限界 COD のばらつきをワイブルプロットしたものである。条件(2)としては、図中の実線で示すように実績の中でも最も靱性の高い場合に対するばらつき特性を目安として選ぶ、この直線のばらつき特性では、 δ_c^B が 0.1 mm 以下になる確率は2%以下と非常に小さい。ところで、一般に要求される限界 COD 値は前述のように(2)式より定まる値、50キロ鋼では 0.1 mm より大きいのが普通であり、一つの目安として次の条件を設定する。

条件(4): 要求曲げ限界 COD 値として API 1104⁶⁾ で示されている 0.25 mm を採用する。

Fig. 8 を見てわかるように、従来の実績では曲げ限界 COD が 0.25 mm を下まわる確率は15%程度といえる。

Fig. 8 Weibull distribution of critical COD for welded joints of LPG storage tank

Fig. 9 Flow chart for evaluating method of bending critical COD value

したがって、1セット3本の試験を行って、1本でも0.25mmを下まわる値がでたのでは条件(2)の従来実績に適合せず、 δ_c^B が0.1mm以下になる確率も実績よりかなり大きくなる可能性が考えられる。1セット3本のうち1本のみが0.25mmを下まわるとき、もう1セット3本の試験を追加してこの3本の試験結果がすべて0.25mm以上となるならば、 $\delta_c=0.25\text{mm}$ 以上の出現確率については実績をクリアし、条件(2)を満足する。しかし、この場合、供試溶接部全体のばらつき特性が条件(2)を満足するとは言えないが、その適合の目安として6本のデータの中央値に注目し、中央値がFig. 8の実線の値0.5mm以上であることを条件とすれば条件(2)をほぼ満足させられる。

以上の観点から、曲げCOD試験を用いて引張り限界CODが要求限界COD値を満足するための判定流れ図をFig. 9に示した。図に示すように、上で述べた条件を満足しなかった場合には、他の何らかの手法(例えば大型破壊試験など)で安全性を確認することが必要となるであろう。

なお、本考察は要求限界COD値として0.25mmを目安としたが、これはLPG貯蔵タンクにこの値が必ず必要であることを意味するものでない。もし、合理的な手法で要求限界COD値が決定されれば、それをもとに全く同じ考え方を適用して合理的な評価を行うことができる。その場合には、Fig. 9に示した具体的な数値は当然変わるものである。さらに、同様の考え方は他の対

象構造物に対して適用が可能である。

7. 結 論

LPG貯蔵タンクを対象構造物として、実用の低温用鋼溶接継手の曲げCOD試験と引張試験を数多く行い、引張り限界CODと曲げ限界CODとの対応、破壊応力との関係、さらに曲げCOD試験を基本とした安全性評価方法について考察を行った。そして、次のことが明らかになった。

- (1) 一般的に曲げ限界CODが一義的に溶接継手の引張挙動を規定しない。深い切欠きをもつ標準の曲げCOD試験で得られる曲げ限界CODとき裂を有する引張試験で得られる引張り限界CODの対応関係は、主として材料の靱性レベルと引張試験片のき裂寸法に依存し、それらによって定まる破壊時までのき裂先端近傍の塑性変形の広がり影響が大きい。
- (2) 引張試験で破壊に先立って全面降伏するような場合には、曲げ限界CODよりもかなり大きな限界CODレベルで初めて破壊する。
- (3) き裂前縁に沿って実用継手でみられるような寸法の小さい劣化部をもつ場合にも、破壊はその劣化部からの発生が支配的である。
- (4) 破壊様式は曲げCOD試験に比べて、引張試験の方が延性的破壊を呈する割合が大きくなる。
- (5) 曲げCOD試験を用いたLPG貯蔵タンクの脆性破壊に対する安全性評価システムについて提案した。

謝 辞

本研究の遂行に当り、広幅引張試験において多大な御協力を賜った住友金属工業㈱中央研究所、有特和茂博士、井坂和実氏に対し、厚く御礼申し上げます。また実験では、大阪大学大学院、瀬戸厚司君より協力をいただいた。ここに記して深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) British Standards Institution: Methods for Crack Opening Displacement (COD) Testing, BS 5762 (1979)
- 2) 貝原正一郎, 村山武弘, 河野武亮, 深川宗光: 低温用鋼溶接部の限界COD値のばらつきに関する一考察, 溶接学会論文集 Vol. 2, No. 1 (1984), pp. 104
- 3) 貝原正一郎, 村山武弘, 河野武亮, 深川宗光, 豊田政男, 佐藤邦彦: 局部的劣化部を含む鋼溶接継手の曲げ限界COD値と引張破壊強度, 溶接学会論文集 Vol. 2, No. 3 (1984), pp. 95
- 4) British Standards Institution: Code of Practice for fixed Offshore Structures, BS 6235 (1982)
- 5) British Standards Institution: Guidance on Some Methods for the Deviation of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints, BS PD 6493 (1980)
- 6) American Petroleum Institute Standard 1104: Standard for Welding Pipelines and Related Facilities, Appendix A Alternative Standards for Acceptability for Girth Welds, Sixteenth Edition (1983)
- 7) Det Norske Veritas: Rules for design, construction and inspection of offshore structures